

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6820020号
(P6820020)

(45) 発行日 令和3年1月27日(2021.1.27)

(24) 登録日 令和3年1月6日(2021.1.6)

(51) Int.Cl.		F I			
GO 1 B	11/24	(2006.01)	GO 1 B	11/24	D
GO 1 B	11/00	(2006.01)	GO 1 B	11/00	B
GO 1 B	9/02	(2006.01)	GO 1 B	9/02	

請求項の数 7 (全 14 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2018-502540 (P2018-502540)</p> <p>(86) (22) 出願日 平成28年12月21日(2016.12.21)</p> <p>(86) 国際出願番号 PCT/JP2016/088196</p> <p>(87) 国際公開番号 W02017/149912</p> <p>(87) 国際公開日 平成29年9月8日(2017.9.8)</p> <p>審査請求日 令和1年11月8日(2019.11.8)</p> <p>(31) 優先権主張番号 特願2016-40061 (P2016-40061)</p> <p>(32) 優先日 平成28年3月2日(2016.3.2)</p> <p>(33) 優先権主張国・地域又は機関 日本国(JP)</p> <p>(出願人による申告)平成25年度、独立行政法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業、総括実施型研究、研究プロジェクト名「ERATO美濃島知的センサープロジェクト」に係る産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願</p>	<p>(73) 特許権者 504133110 国立大学法人電気通信大学 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1</p> <p>(74) 代理人 100106909 弁理士 棚井 澄雄</p> <p>(74) 代理人 100175824 弁理士 小林 淳一</p> <p>(74) 代理人 100169764 弁理士 清水 雄一郎</p> <p>(72) 発明者 美濃島 薫 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内</p> <p>審査官 九鬼 一慶</p>
--	---

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 形状測定方法及び形状測定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

時間軸に対する所定の周波数分布を有する光パルスが時系列に番号順に複数配された光パルス列を被測定物体に照射する工程と、

出射された前記光パルス列が前記被測定物体の互いに異なる位置に作用した後の複数の受光対象光パルス列同士の前記光パルスの前記番号の差と、前記光パルス内の前記周波数の差とによって前記被測定物体の光学的形状を測定する工程と、

を備え、

前記光パルス列を前記被測定物体に照射する工程において、

光パルスは時系列に時間間隔を空けて番号順に複数配され、互いにコヒーレントであり、前記時系列で隣り合う前記光パルス同士の位相がずれており、

前記被測定物体の光学的形状を測定する工程において、

前記受光対象光パルス列の光パルスの時系列における番号順の配置は出射直後の前記光パルスの時系列における番号順の配置と同じである、

形状測定方法。

【請求項2】

前記光パルスの周波数分布は時間軸に対して非線形又は不連続であり、且つ前記光パルスは分布内の周波数に対応する時間を一意に算出可能な周波数分布を有する、

請求項1に記載の形状測定方法。

【請求項3】

前記光パルス列は光コム¹の離散的モード周波数の位相を制御することによって得られる

請求項 1 又は請求項 2 に記載の形状測定方法。

【請求項 4】

前記複数の受光対象光パルス列同士の前記光パルスの前記番号の差は、前記受光対象光パルス列と所定の光路長を有する伝搬空間内を伝搬した参照光パルス列とが干渉することにより発生する干渉信号を用いて得られる、

請求項 1 から請求項 3 の何れか一項に記載の形状測定方法。

【請求項 5】

時間軸に対する所定の周波数分布を有する光パルスが時系列に番号順に複数配された光パルス列を被測定物体に照射する光源と、

前記光源から出射された前記光パルス列が前記被測定物体の互いに異なる位置に作用した後の複数の受光対象光パルス列同士の前記光パルスの前記番号の差と、前記光パルス内の前記周波数の差とによって前記被測定物体の光学的形状を測定する光学的形状測定部と

を備え、

前記被測定物体に照射される前記光パルスは時系列に時間間隔を空けて番号順に複数配され、互いにコヒーレントであり、前記時系列で隣り合う前記光パルス同士の位相がずれており、

前記受光対象光パルス列の光パルスの時系列における番号順の配置は前記光源から出射直後の前記光パルスの時系列における番号順の配置と同じである、

形状測定装置。

【請求項 6】

前記光パルスの周波数分布は時間軸に対して非線形又は不連続であり、且つ前記光パルスは分布内の周波数に対応する時間を一意に算出可能な周波数分布を有する、

請求項 5 に記載の形状測定装置。

【請求項 7】

前記光源は、離散的モード周波数の位相が制御されることによって前記光パルス列を出射可能な光コムを備える、

請求項 5 又は請求項 6 に記載の形状測定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、形状測定方法及び形状測定装置に関する。本願は、2016年3月2日に、日本に出願された特願2016-40061号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

【背景技術】

【0002】

光を用いて測定対象（被測定物体）の形状等を測定する方法は、非接触・非破壊であるという優れた特徴を持っており、工業、医療をはじめとして基礎科学の分野への応用が期待されている。光を用いた形状測定装置としては、例えば所謂モアレ法と呼ばれ、コード化された光のパターンを用いた方法、測距法に基づいた方法等の種々の方法が提案されている。

【0003】

例えば、特許文献1には、色が規則的に経時変化するチャープ光パルスを生成するチャープ光パルス生成手段と、被測定物（被測定物体）を介して該チャープ光生成手段からのチャープ光を取得し、取得した測定基準時における反射光の二次元情報を光色に基づいて三次元化する三次元情報取得手段と、を備えた三次元計測装置が開示されている。この三次元計測装置では、チャープ光生成手段によって生成したチャープ光パルスを被測定物に照射すると、被測定物を介して取得光が得られる。測定基準時に三次元情報取得手段によ

10

20

30

40

50

って取得された取得光の色情報は、被測定物の三次元形状と関係づけられる。

【0004】

別の形状測定技術として、例えば、特許文献2には、測定対象に光が射出されてから反射像が取り込まれるまでの時間を用いて測定対象までの距離を計測する三次元形状計測法（形状測定方法）であって、射出される光の順番をコード化し、前記コード化された光の反射像をデコードすることにより距離計測を行う三次元形状計測法が開示されている。この三次元形状計測法において、測定対象に向けて射出される光には、平面光あるいは略平面光が用いられる。また、光の順番のコード化は、射出される光の波長あるいは光の射出のタイミングを変えることにより行われる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】日本国特開平7-229725号公報

【特許文献2】日本国特開2000-74637号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、特許文献1に開示されている形状測定方法では、ナノメートル（ $nm = 10^{-9} m$ ）オーダーの測定分解能を得られるが、この測定分解能とそれに比べて比較的大きい（例えば、メートル（ m ）オーダー）測定範囲とを両方実現することは難しいという問題があった。従って、特許文献1に開示されている形状測定方法では、例えば m オーダーで変化する光学的表面に nm オーダーの微細構造が形成されているような被測定物体の光学的形状を測定する際には、特許文献1に開示されている形状測定方法と光学的表面の変化を測定するための別の測定技術とを組み合わせる必要があった。

また、特許文献2に開示されている三次元形状計測法では、測定対象に光が射出されてから反射像が取り込まれるまでの時間を用いる性質上、フェムト秒（ $fs = 10^{-15} s$ ）オーダーの時間分解能を実現することは難しいという問題があった。

【0007】

本発明は、上述の問題を解決するためになされたものであって、ナノメートルオーダーの測定分解能とメートルオーダーの測定範囲とフェムト秒オーダーの時間分解能とを実現可能な形状測定方法及び形状測定装置を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明の形状測定方法は、時間軸に対する所定の周波数分布を有する光パルスが時系列に番号順に複数配された光パルス列を被測定物体に照射する工程と、出射された前記光パルス列が前記被測定物体の互いに異なる位置に作用した後の複数の受光対象光パルス列同士の前記光パルスの前記番号の差と、前記光パルス内の前記周波数の差とによって前記被測定物体の光学的形状を測定する工程と、を備え、前記光パルス列を前記被測定物体に照射する工程において、光パルスは時系列に時間間隔を空けて番号順に複数配され、互いにコヒーレントであり、前記時系列で隣り合う前記光パルス同士の位相がずれており、前記被測定物体の光学的形状を測定する工程において、前記受光対象光パルス列の光パルスの時系列における番号順の配置は出射直後の前記光パルスの時系列における番号順の配置と同じである。

本発明の形状測定方法では、前記光パルスの周波数分布は時間軸に対して非線形又は不連続であり、且つ前記光パルスは分布内の周波数に対応する時間を一意に算出可能な周波数分布を有してもよい。

【0009】

上述の形状測定方法において、前記光パルス列は光コムの離散的モード周波数の位相を制御することによって得られることが好ましい。

【0010】

10

20

30

40

50

また、上述の形状測定方法において、前記複数の受光対象光パルス列同士の前記光パルスの前記番号の差は、前記受光対象光パルス列と所定の光路長を有する伝搬空間内を伝搬した参照光パルス列とが干渉することにより発生する干渉信号を用いて得られてもよい。

【0011】

本発明の形状測定装置は、時間軸に対する所定の周波数分布を有する光パルスが時系列に番号順に複数配された光パルス列を被測定物体に照射する光源と、前記光源から出射された前記光パルス列が前記被測定物体の互いに異なる位置に作用した後の複数の受光対象光パルス列同士の前記光パルスの前記番号の差と、前記光パルス内の前記周波数の差とによって前記被測定物体の光学的形状を測定する光学的形状測定部と、を備え、前記被測定物体に照射される前記光パルスは時系列に時間間隔を空けて番号順に複数配され、互いに
10
コヒーレントであり、前記時系列で隣り合う前記光パルス同士の位相がずれており、前記受光対象光パルス列の光パルスの時系列における番号順の配置は前記光源から出射直後の前記光パルスの時系列における番号順の配置と同じである。

本発明の形状測定装置において、前記光パルスの周波数分布は時間軸に対して非線形又は不連続であり、且つ前記光パルスは分布内の周波数に対応する時間を一意に算出可能な周波数分布を有してもよい。

【0012】

本発明の形状測定装置は、前記光源は、離散的モード周波数の位相が制御されることによって前記光パルス列を出射可能な光コムを備えていてもよい。

【発明の効果】

20

【0013】

本発明によれば、複数の受光対象光パルス列同士の光パルスの番号の対応関係によって被測定物体の光学的形状を測定することで、例えばメートルオーダーの広い測定範囲が実現される。また、光パルス内の周波数分布が適宜設定され、複数の受光対象光パルス列同士の光パルスの所定の周波数分布の対応関係によって被測定物体の光学的形状を測定することで、ナノメートルオーダーの測定分解能とフェムト秒オーダーの時間分解能とを実現可能な形状測定方法及び形状測定装置が得られる。

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】本発明に係る形状測定方法の実施形態の原理を説明するための模式図であり、光パルス列が被測定物体に照射される様子を示す図である。

30

【図2】光コムの原理を示す模式図である。

【図3】本発明に係る形状測定方法の実施形態の原理を説明するための模式図であり、光パルス列が被測定物体から反射する様子を示す図である。

【図4】本発明に係る形状測定方法の実施形態における光パルスにおいて時間的に変化する周波数分布の変形例を示す模式図であって、(a)、(b)は時間軸に対して線形に変化する周波数分布を表し、(c)、(d)は時間軸に対して二次関数的に変化する周波数分布を表し、(e)、(f)は段階的に変化する周波数分布を表している。

【図5】本発明に係る形状測定装置の実施形態における構成を示す概略図である。

【図6】本発明に係る形状測定装置の実施形態における構成の変形例を示す概略図である

40

【発明を実施するための形態】

【0015】

以下、本発明に係る形状測定方法及び形状測定装置の実施形態について、図面を参照して説明する。なお、以下の説明で用いる図面は模式的なものであり、長さ、幅、及び厚みの比率等は実際のものとは限らず、適宜変更することができる。

【0016】

本実施形態の形状測定方法は、時間軸に対する所定の周波数分布を有する光パルスが時系列に番号順に複数配された光パルス列を被測定物体に照射する工程（以下、第一工程とする）と、出射された光パルスが被測定物体に作用した後の複数の受光対象光パルス列同
50

士の光パルスの番号の対応関係と、光パルス内の周波数分布の対応関係とによって被測定物体の光学的形状を測定する工程（以下、第二工程とする）と、を備えている。以下、各工程について説明する。

【0017】

（第一工程）

第一工程で用いられる照射用光パルス列（光パルス列）A0は、時間軸に対する所定の周波数分布を有する光パルスOP(k)（但し、kは整数）が時系列に番号kの順番通り（番号順）に複数配されていれば（即ち、時間軸上でOP(1), OP(2), ..., OP(k)の順に配されていれば）、特に限定されない。このような照射用光パルス列の好適な例として、光コム（又は、光周波数コム）に含まれる複数の離散的モード周波数と隣接する離散的モード周波数間の位相や強度とを制御することによって得られる光パルス列が挙げられる。

10

【0018】

上述のように、光コムに含まれる複数の離散的モード周波数と隣接する離散的モード周波数間の位相や強度とを制御することによって、異なる周波数の光が所定の規則に基づいて時間軸上に並べられたチャープ光パルスや異なる周波数の光が所定の規則に基づいて時間軸上でコード化された光パルスが得られる。また、光コムに含まれる複数の離散的モード周波数と隣接する離散的モード周波数間の位相や強度とを制御することによって、これらのチャープ光パルスやコード化された光パルスが時系列に番号順に複数配されたチャープ光パルス列やコード化光パルス列が得られる。例えば、チャープ光パルスが用いられることで、超短光パルスの時間情報が時間軸上で連続的な周波数情報（即ち、色情報）に変換される。

20

【0019】

光パルスOP(k)として、図1には、周波数が時間軸上で連続的に変化するチャープ光パルスCP(k)を例示している。

以下、光パルスOP(k)として、不図示の光コムから得られるチャープ光パルス列CP(k)を用いる場合を想定して説明する。

【0020】

光コムのパルスの時間幅 τ と周波数の広がり $\Delta\nu$ との間には、(1)式に示す関係が成り立つ。

30

【0021】

【数1】

$$\tau \geq \frac{1}{\Delta\nu} \quad \dots (1)$$

【0022】

図2の上段に示すように、一定の繰り返し時間 T_{rep} で発振される超短光パルス列は、周波数で見ると一定の周波数間隔 f_{rep} を持っている。繰り返し時間 T_{rep} と周波数間隔 f_{rep} との間には、(2)式に示す関係が成り立つ。

40

【0023】

【数2】

$$f_{rep} = \frac{1}{T_{rep}} \quad \dots (2)$$

【0024】

ここで、多数のパルス列に注目すると、光パルス列は光源の共振器等の内部で伝搬する多くの縦モードの重ね合わせから成り立っている。光パルス列は、これらの縦モードの重ね合わせの波である搬送波（キャリアとも呼ばれる）と、その包絡線（エンベロップとも

50

呼ばれる)を構成する波束と、によって構成されている。空気等の分散媒質が存在する領域中では、搬送波は位相速度 v_p で移動し、波束は位相速度 v_p と異なる群速度 v_g で移動する。このように、搬送波と波束とでは互い速度が異なるため、時間の経過に伴い、位相差が生じる。レーザー共振器は分散媒質より構成されているため、それより、繰り返し時間 T_{rep} 異なる時間ごとに繰り返し発せられるパルス列においては、隣り合うパルス間に位相のずれ ϕ_{CEO} が生じる。位相のずれ ϕ_{CEO} は時間 T_{CEO} で一周する。繰り返し時間 T_{rep} 、時間 T_{CEO} 及び位相のずれ ϕ_{CEO} の間には、(3)式に示す関係が成り立つ。

【0025】

【数3】

$$T_{rep} = \left(\frac{\phi_{CEO}}{2\pi} \right) T_{CEO} \quad \dots (3)$$

【0026】

上述した時間軸上における超短パルス列をフーリエ変換し、周波数軸上で観測すると、図2の下段に示すように、互いに時間間隔 T_{rep} の逆数に相当する繰り返し周波数 f_{rep} の間隔をあけて並んだ多数のスペクトルが観測される。このように櫛の歯を成すように配置されている複数のスペクトルが光コムであり、光コムの全体のスペクトル幅は、超短光パルスの時間幅の逆数 ($1/T_{rep}$) に相当する。

【0027】

詳しくは、図2の下段に示すように、光コムのスペクトルを中心周波数から繰り返し周波数 f_{rep} の間隔で0(零)Hzまで仮想的に伸ばしていくと、最後に繰り返し周波数 f_{rep} 以下の余りの周波数が存在する。余りの周波数は、キャリア・エンベロップ・オフセット (Carrier Envelope Offset: CEO) f_{CEO} と呼ばれている。キャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} は、時間 T_{CEO} の逆数に相当する。そして、キャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} 、位相のずれ ϕ_{CEO} 、時間 T_{CEO} の間には、(4)式に示す関係が成り立つ。

【0028】

【数4】

$$f_{CEO} = \left(\frac{\phi_{CEO}}{2\pi} \right) f_{rep} \quad \dots (4)$$

【0029】

また、光コムの m 番目のスペクトルの周波数は、繰り返し周波数 f_{rep} とキャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} とをパラメータとして、(5)式のように表される。

【0030】

【数5】

$$f(m) = m \times f_{rep} + f_{CEO} \quad \dots (5)$$

【0031】

即ち、光コムをなす複数のスペクトル(即ち、周波数)を制御することで、搬送波や包絡線を制御することができ、さらには光パルス列における周波数分布及び超短光パルスの時間幅(即ち、時間)を制御することができる。

図1及び図3に示すチャープ光パルス列 $CP(k)$ は、搬送波の周波数が各々の超短光パルスの時間幅内で変化するように光コムの複数のスペクトル等が変調されてなるもので、各々の超短光パルスの色情報を時間および空間に展開したものである。本実施形態では、被測定物体 S の光学的形状を測定するのに十分な測定精度、および対象位置を動かさず

10

20

30

40

50

に任意位置での測定の実現ができることを勘案し、光コム複数のスペクトルや搬送波及び包絡線を変調及び制御することが好ましい。

【0032】

第一工程では、図1に示すように、色情報を伴うチャープ光パルス $CP(k)$ （但し、 k は整数）が時系列に番号 k （ $k=1, 2, 3, \dots, m$ （但し、 m は整数））の順に複数配されてなる照射用光パルス列 A_0 を被測定物体 S に照射する。例えば、被測定物体 S が鏡面等の反射面を有する段差を備えている場合（図1に示す凸部表面 F_1 および凹部表面 F_2 が反射面である場合等）には、照射用光パルス列 A_0 は、被測定物体 S の面方向（即ち、図1及び図3における紙面上下方向）に対して略垂直な方向（即ち、図1及び図3における紙面左右方向）から照射するのが好ましい。これにより、測定系を略直線状に配置し、シンプルな構成とすることができる。なお、被測定物体 S に対する照射用光パルス列 A_0 の照射角度、即ち被測定物体 S の面方向に直交する軸（図示略）に対して照射用光パルス列 A_0 が照射される方向がなす角度は、特に限定されない。被測定物体 S が任意の形状（例えば、複雑な曲面を有する形状等）を有する場合には、イメージング光学系を用いて被測定物体 S に作用した後の光として散乱光も効率良く取得するのが好ましい。

10

【0033】

（第二工程）

第二工程では、被測定物体 S の光学的形状を測定するために、チャープ光パルス $CP(k)$ が被測定物体 S に作用した後の複数の受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n （但し、 n は整数）同士の光パルス $CP(k)$ の番号 k の対応関係と、チャープ光パルス $CP(k)$ 内の周波数分布の対応関係について測定する。

20

【0034】

図1及び図3には、照射用光パルス列 A_0 の照射方向に対して凹凸形状を有する被測定物体 S を例示している。また、被測定物体 S は照射用光パルス列 A_0 を反射可能な材質からなり、照射用光パルス列 A_0 は凸部表面 F_1 及び凹部表面 F_2 で反射される。なお、被測定物体 S の光学的形状は、凹凸形状に限らず、屈折率の変化や層状に境界面を有する場合等、チャープ光パルス $CP(k)$ が作用を受け得る光学的形状を全て含んでいる。

【0035】

図3に示すように、凸部表面 F_1 が凹部表面 F_2 よりも照射用光パルス列 A_0 の照射方向に突出しているため、受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n の出射方向を法線とする面 P において、チャープ光パルス $CP(k)$ が被測定物体 S から反射した後の複数の受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n 同士のチャープ光パルス $CP(k)$ の番号 k の対応関係と、チャープ光パルス $CP(k)$ の周波数分布（即ち、色情報）の対応関係が得られる。

30

【0036】

複数の受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n のそれぞれのチャープ光パルス $CP(k)$ の番号 k の対応関係は、例えば干渉計測等を用いて、受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n と所定の光路長を有する伝搬空間内を伝搬した参照光パルス列とが干渉することにより発生する干渉信号を用いて得ることができる。

【0037】

受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n のそれぞれのチャープ光パルス $CP(k)$ は互いにコヒーレントであり、受光対象光パルス列とは異なる光路を伝搬した光パルス列（以下、干渉用光パルス列）と干渉可能である。

40

【0038】

図3に示すように、測定領域内の所定の面 P において、超高速シャッター又は位相検出等の方法により、受光対象光パルス列 B_1, B_2 を瞬時に切り出すと、受光対象光パルス列 B_1 の3番目のチャープ光パルス $CP(3)$ と受光対象光パルス列 B_2 の2番目のチャープ光パルス $CP(2)$ とが得られる。従って、受光対象光パルス列 B_1, B_2 同士のチャープ光パルス $CP(k)$ の番号 k の対応関係から、受光対象光パルス列 B_1, B_2 のそれぞれのチャープ光パルス $CP(k)$ の番号 k 同士のずれは1である、即ち、凸部表面 F

50

1 と凹部表面 F 2 とは一つのチャープ光パルス C P (k) 分の光学的形状の変化があることがわかる。さらに、受光対象光パルス列 B 1 , B 2 同士のチャープ光パルス C P (k) の周波数分布の対応関係から、周波数 x (即ち、色 C 1 (x)) と周波数 y (即ち、色 C 2 (y)) との差に相当する凸部表面 F 1 と凹部表面 F 2 との光学的形状の変化があることがわかる。そして、チャープ光パルス C P (k) の番号 k の対応関係及びチャープ光パルス C P (k) の周波数分布の対応関係から測定・検出された結果を合わせ、凸部表面 F 1 と凹部表面 F 2 との間の厚み寸法 T 等を含む被測定物体 S の光学的形状を測定することができる。

【 0 0 3 9 】

以上説明したように、本実施形態の形状測定方法では、第一工程及び第二工程を行うことで、受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n 同士のチャープ光パルス C P (k) の番号 k の対応関係からは、番号 k のずれによってメートルオーダーの比較的大きな光学的形状の変化が検出される。一方、受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n 同士のチャープ光パルス C P (k) の周波数分布の対応関係からは、ナノメートルオーダーの測定分解能相当の光学的形状の変化が検出される。また、これらの対応関係を所定の面 P、即ち受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n の出射方向を法線とする共通の空間上の位置で瞬時に検知するため、フェムト秒オーダーの時間分解能が得られる。従って、本実施形態の形状測定方法によれば、メートルオーダーの広い測定範囲とナノメートルオーダーの測定分解能とフェムト秒オーダーの時間分解能とを実現することができる。そして、被測定物体 S に関する多次元情報が一度に計測される。

従来のように単一の光パルスを用いた場合は、測定範囲が単一のチャープ光パルスの幅で決められるため、メートルオーダー以上の大きな測定対象への適用は難しかったが、本実施形態の形状測定方法では従来の測定範囲の限界を超える大きな測定範囲が得られる。

【 0 0 4 0 】

また、本実施形態の形状測定方法によれば、照射用光パルス A (0) に光コムから得られる光パルス列を用いることで、光コムの超短パルスの時間・空間・周波数が互いに密な相互関係を有することに起因する制御性を最大限に駆使することができると共に、連続的な周波数分布を有するチャープ光パルスを被測定物体 S に照射することができる。本実施形態の形状測定方法によれば、第二工程において被測定物体 S の光学的形状を測定する際に、ナノメートルオーダーの測定分解能とメートルオーダーの測定範囲とフェムト秒オーダーの時間分解能とを容易に実現することができる。また、前述の制御性を最大限に駆使することで、従来のように単一の光パルスを用いた場合（例えば、特許文献 1 に記載の三次元計測装置を用いた計測技術）等の計測における測定分解能と測定範囲とのトレードオフを解消し、測定分解能と測定範囲とを確保し易くすることができる。

また、従来のように単一の光パルスを用いた場合（例えば、特許文献 1 に記載の三次元計測装置を用いた計測技術）等の計測においては、高速シャッターで像を取得するタイミングとチャープ光パルスの反射してくるタイミングを一致させる必要があり、計測できる位置に物体を設置するか、シャッターの切り出しのタイミングを変えるためにゲート光パルスの光路長を可変ステージ等で変化させる必要があった。しかし、本実施形態の形状測定方法によれば、光コムの前述の制御性を最大限に駆使することで、ステージや物体の機械的な移動を伴うことなく、精密にタイミングを合わせることができ、任意の位置での測定が可能となる。

【 0 0 4 1 】

なお、本実施形態では、光パルスとして、光コムから得られるチャープ光パルス C P (k) を例示して説明したが、本発明に係る形状計測方法における光パルスは、チャープ光パルス C P (k) に限定されない。チャープ光パルス C P (k) のように、連続スペクトル情報に起因して図 4 (a) , (b) に示すように線形の連続的な周波数分布を有する光パルスを用いることは、ナノメートルオーダーの測定分解能を得る点でもより好適であるが、周波数から時間を一意に決定することができれば、装置の構成を変更することなく、これらの関係性を校正曲線としてあらかじめ測定することができる。従って、本発明に係

10

20

30

40

50

る形状計測方法における光パルスとして、図4(c), (d)に示すように二次関数的に増大又は減少する周波数分布を有する光パルスを用いてもよく、図4(e), (f)に示すように段階的に変化する周波数分布を有する光パルスを用いてもよく、これら以外の周波数分布を有する光パルスを用いてもよい。

【0042】

次に、本実施形態の形状測定装置について、説明する。

本実施形態の形状測定装置10Aでは、上述した本実施形態の形状測定方法と同様に、光パルスとして、図2に示す光コムから得られるチャープ光パルスを用いることとする。

【0043】

図5に示すように、形状測定装置10Aは、少なくとも時間軸に対する所定の周波数分布を有する光パルスが時系列に番号順に複数配された光パルス列を被測定物体に照射する光源1と、光源1から出射された光パルスが被測定物体Sに作用した後の複数の受光対象光パルス列同士の前記光パルスの前記番号の対応関係と、前記光パルス内の前記周波数分布の対応関係とによって前記被測定物体の光学的形状を測定する光学的形状測定部20と、を備えている。

10

【0044】

本実施形態では、光源1は、光コム光源であり、光コムを出射可能に構成されている。光源1から出射される光コムの繰り返し周波数 f_{rep} およびキャリア・エンベロップ・オフセット f_{ceo} は、不図示の周波数標準によって安定化制御されている。なお、光源1から出射される光コムの繰り返し周波数 f_{rep} は、制御部8によって制御されている。制御部8による繰り返し周波数 f_{rep} の制御によって、後述のように、シャッター6のタイミングは可変になっている。

20

【0045】

光源1としては、例えば、チタンサファイアレーザーと非線形光学効果との組み合わせを使用することができる。詳しくは、増幅したチタンサファイアレーザー等を光源とし、水等の非線形光学効果を用いることができる。チタンサファイアレーザーで発生させた光コムから水等の非線形光学効果により発生させたチャープ光パルス及び光パルス列を照射用光パルス列として用いることができる。このように発生させたチャープ光パルスは、可視光全域にわたる周波数分布を有する。光パルス列においては、前述のチャープ光パルスが時系列に繰り返されている。また、よりコンパクトで安定な実用的光源であるファイバレーザーと光ファイバから発生させたチャープ光パルス及びそのパルス列を利用すれば、実用的な計測手法や装置を実現することができる。

30

【0046】

光源1から出射された照射用光パルス列A0の一部は、ミラー(ビームスプリッター)3aを通り、チャープ光パルス生成装置2によって、光源1から出射された光コムの光パルスを適宜チャープする。チャープ光パルス生成装置2からは、周波数が時間軸上で連続的に変化するチャープ光パルスが時系列に番号kの順番通りに複数配されてなる光パルス列が出射される。光パルス列は、ビームエキスパンダー4に入射し、被測定物体Sの測定対象部分の大きさに合わせて拡げられる。拡げられた照射用光パルス列A0(図5では不図示)は、被測定物体Sに照射される(図3参照)。被測定物体Sの光学的形状による作用(図5では反射)に応じて複数の受光対象光パルス列B1, B2, ..., Bnが得られる(図3参照)。なお、被測定物体Sが照射用パルス列A0を透過する場合は、被測定物体Sの照射用光パルス列A0の伝搬方向後方の所定の位置にミラー等の反射部材を配置してもよい。被測定物体Sが照射用パルス列A0を透過する場合は、被測定物体Sの照射用光パルス列A0の伝搬方向後方から所定の距離をもってミラー3bに受光対象光パルス列B1, B2, ..., Bnを導いてもよい。

40

【0047】

光源1から出射された照射用光パルス列A0の残部は、ミラー3aで反射され、ゲート用光路13に入射し、光基準面14に照射される。光基準面14に照射された照射用光パルス列A0は反射され、ゲート用光路13を伝搬し、ミラー3aに入射する。

50

【 0 0 4 8 】

被測定物体 S から反射してミラー 3 a に入射した受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n はミラー 3 a で反射された後に光基準面 1 4 で反射され、ミラー 3 a に入射する。ミラー 3 a を透過した受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n は、照射用光パルス列 A 0 と共にミラー 3 b に入射し、ミラー 3 b で反射され、シャッター 6 を通過する。

なお、ミラー 3 a , 3 b はビームスプリッター等に変更されてもよい。

【 0 0 4 9 】

シャッター 6 を通過した受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n は、光基準面 1 4 で反射された照射用光パルス列 A 0 (以下、ゲート用光パルス列とする)によって決められたタイミングで駆動されたシャッター 6 で切り出されると共に、光学的形状測定部 2 0 に入射する。

シャッター 6 としては、例えば二硫化炭素 (C S ₂) 分子液体の光カーシャッターや非線形光学効果を用いたフェムト秒 (f s) 程度の短い応答時間を有し、開閉時刻に空間分布 (即ち、受光対象光パルス列の出射方向における空間の幅)を持たない超高速なシャッターを用いることが好ましい。

【 0 0 5 0 】

受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n が切り出されるとき、光コム of 繰り返し周波数 (パルス列の間隔)を変化させると、ゲート用パルス列がシャッター 6 に到達するタイミングが変化するので、シャッターによる切り出しのタイミングが変化する。光学的形状測定部 2 0 では、ゲート用光路 1 3 に設けられた光路長調整部 1 5 によって、ゲート用パルス列がシャッター 6 に到達するタイミングの可動範囲が充分に大きくなるように調整しておく。そして、予め、光コム of 繰り返し周波数を僅かに変化させたときにシャッター 6 で切り出された各々の受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n の周波数の変化の関係から、形状測定装置 1 0 A の装置構成を変更することなく、チャープ光パルス C P (k) の番号 k の情報を取得することができる。このとき、チャープ光パルス C P (k) の番号 k が大きくなる程、繰り返し周波数を僅かに変化させたときの、シャッター 6 で切り出された各々の受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n の周波数の変化の割合が大きくなる。従って、得られた各々の受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n の周波数の変化の割合によって番号 k を算出することができる。そして、得られた各々の受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n のチャープ光パルス C P (k) の番号 k をふまえ、受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n 同士のチャープ光パルス C P (k) の番号 k の対応関係から、番号 k のずれを算出する。そして、番号 k のずれの分に相当する被測定物体 S の光学的形状の差を算出する。

また、光学的形状測定部 2 0 では、シャッター 6 で切り出された各々の受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n の周波数の情報に基づいて受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n 同士のチャープ光パルス C P (k) の周波数の差異を検出する。そして、前述の差異から求まるチャープ光パルス C P (k) の周波数分布の対応関係から、周波数の差に相当する被測定物体 S の光学的形状の差を算出する。

そして、光学的形状測定部 2 0 では、チャープ光パルス C P (k) の番号 k の対応関係及びチャープ光パルス C P (k) の周波数分布の対応関係から算出された結果を合わせ、被測定物体 S の光学的形状を測定する。

【 0 0 5 1 】

形状測定装置 1 0 A の変形例として、図 6 に示す形状測定装置 1 0 B が挙げられる。形状測定装置 1 0 B においては、受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ... , B n とゲート用パルス列とのスペクトル干渉縞像を取得し、パルス同士が重なったときに干渉縞の周波数軸上の間隔がもっとも粗くなるというスペクトル干渉の性質を用いている。チャープした受光対象光パルス列においては、時間とともに搬送波周波数が変化するので、チャープした受光対象光パルス列とチャープしていないゲート光パルス列との干渉においては、パルス列の重なる時間は周波数によって異なる。そのため、干渉信号の光スペクトル (周波数) に応じて干渉縞間隔が変化するので、前述のように、受光対象光パルス列 B 1 , B 2 , ...

10

20

30

40

50

、 B_n とゲート用パルス列との干渉信号の光スペクトル依存性を解析し、干渉縞間隔がもっとも粗い光周波数の情報を取得することによって、シャッターの代替とすることができる。図6に示すように、まず、受光対象光パルス列とゲート光パルス列とのスペクトル干渉縞は、スペクトル分解部22内の回折格子等によってスペクトル分解される。スペクトル分解されたスペクトル干渉縞は、干渉画像取得部24によって画像取得され、干渉縞信号処理部26によってスペクトル干渉縞の間隔が簡単な解析によって取得され、最も干渉縞間隔の粗い干渉縞を与える光周波数の情報が取得される。

【0052】

形状測定装置10Bでは、チャープ光パルス $CP(k)$ の番号 k の情報は、次に説明するように取得することができる。即ち、形状測定装置10Aの場合と同様に、予め、光コムの高精度な制御性を生かし、繰り返し周波数(パルス列の間隔)を僅かに変化させることによって、ゲート用パルス列と各々の受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n とのタイミングを変化させる。その後、スペクトル干渉縞における干渉縞間隔がもっとも粗い光周波数の変化の関係から、形状測定装置10Bの装置構成を変更することなく、チャープ光パルス $CP(k)$ の番号 k の情報を取得することができる。

そして、得られた各々の受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n のチャープ光パルス $CP(k)$ の番号 k をふまえ、受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n 同士のチャープ光パルス $CP(k)$ の番号 k の対応関係から、番号 k のずれを算出する。また、番号 k のずれの分に相当する被測定物体 S の光学的形状の差を算出する。

また、光学的形状測定部20では、シャッター6で切り出された各々の受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n のスペクトル干渉縞における干渉縞間隔がもっとも粗い光周波数の情報に基づいて受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n 同士のチャープ光パルス $CP(k)$ の周波数の差異を検出する。そして、前述の差異から求まるチャープ光パルス $CP(k)$ の周波数分布の対応関係から、周波数の差に相当する被測定物体 S の光学的形状の差を算出する。

そして、光学的形状測定部20では、チャープ光パルス $CP(k)$ の番号 k の対応関係及びチャープ光パルス $CP(k)$ の周波数分布の対応関係から算出された結果を合わせ、被測定物体 S の光学的形状を測定する。

このような構成を採用した場合には、高強度レーザーを必要とする非線形光学効果を用いる必要がないという利点がある。

【0053】

以上説明したように、本実施形態の形状測定装置10A, 10Bによれば、受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n 同士のチャープ光パルス $CP(k)$ の番号 k の対応関係からは、番号 k のずれによってメートルオーダーの比較的大きな光学的形状の変化を検出することができる。一方、受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n 同士のチャープ光パルス $CP(k)$ の周波数分布の対応関係からは、ナノメートルオーダーの測定分解能相当の光学的形状の変化を検出することができる。また、シャッター6を用いて受光対象光パルス列 B_1, B_2, \dots, B_n 同士のチャープ光パルス $CP(k)$ の周波数分布の対応関係を瞬時に検知し、時間・空間・周波数の相互変換を駆使することにより、フェムト秒オーダーの時間分解能が得られる。従って、本実施形態の形状測定方法によれば、メートルオーダーの広い測定範囲とnmオーダーの測定分解能とフェムト秒オーダーの時間分解能とを実現することができる。

【0054】

また、本実施形態の形状測定装置10A, 10Bによれば、光源1に光コム光源を用いることで、光コムの超短パルスの時間・空間・周波数を最大限に駆使することができると共に、連続的な周波数分布を有するチャープ光パルスを被測定物体 S に照射することができる。これにより、被測定物体 S の光学的形状を測定する際に、ナノメートルオーダーの測定分解能とメートルオーダーの測定範囲とフェムト秒オーダーの時間分解能とを容易に実現することができる。また、時間・空間・周波数を最大限に駆使することで、測定分解能と測定範囲とのトレードオフを解消することができる。さらに、ステージや物体の機械

的移动を伴うことなく任意の位置での高精度測定が可能となる。

【産業上の利用可能性】

【0055】

上述したように、本発明によれば、ナノメートルオーダーの測定分解能とメートルオーダーの測定範囲とフェムト秒オーダーの時間分解能とを同時に実現し、被測定物体Sの光学的形状を非接触・非破壊で測定することができる。従って、本発明は、アスペクト比の高い形状計測を必要とする産業分野や、眼底検査等のようにリアルタイムでの高精度な観測を必要とする生体医療分野をはじめとする、広い分野で応用可能である。また、高速な時間分解能を生かして、レーザー加工の状態を瞬時に測定するなど、高速に状態の変化する形状測定に応用可能である。

10

【0056】

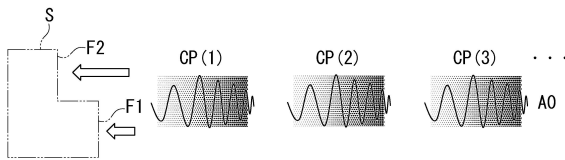
以上、本発明の好ましい実施形態について詳述したが、本発明に係る特定の実施形態に限定されるものではなく、特許請求の範囲内に記載された本発明の要旨の範囲内において、種々の変形・変更が可能である。

【符号の説明】

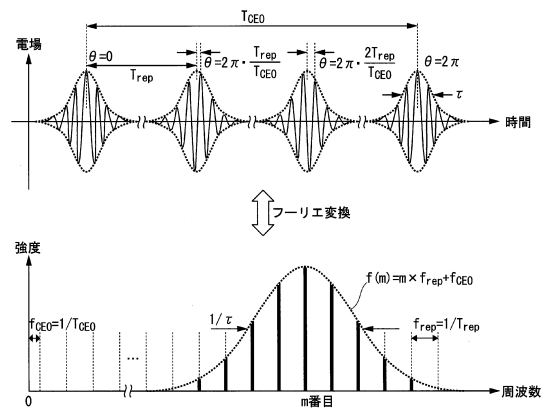
【0057】

- 1・・・光源
- 10・・・形状測定装置
- 20・・・光学的形状測定部

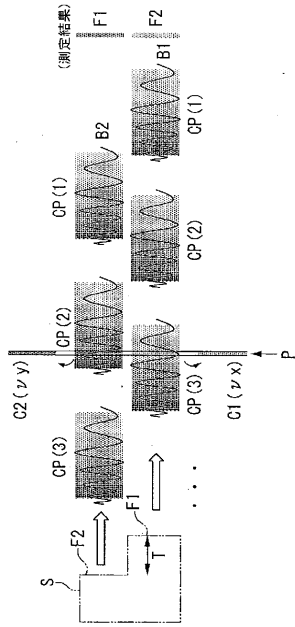
【図1】



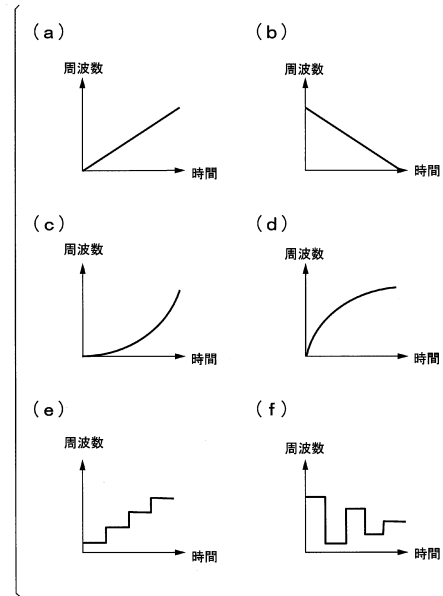
【図2】



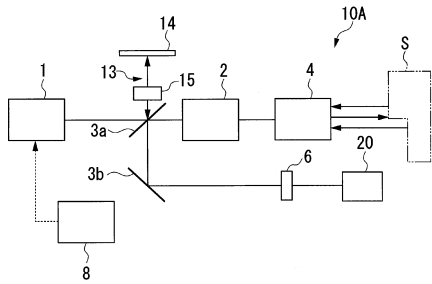
【 図 3 】



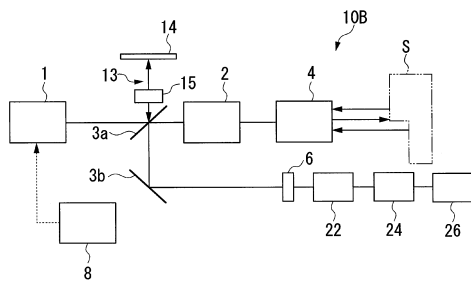
【 図 4 】



【 図 5 】



【 図 6 】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2011-013104(JP,A)
特開2003-126044(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B 11/24

G01B 11/00

G01B 9/02